

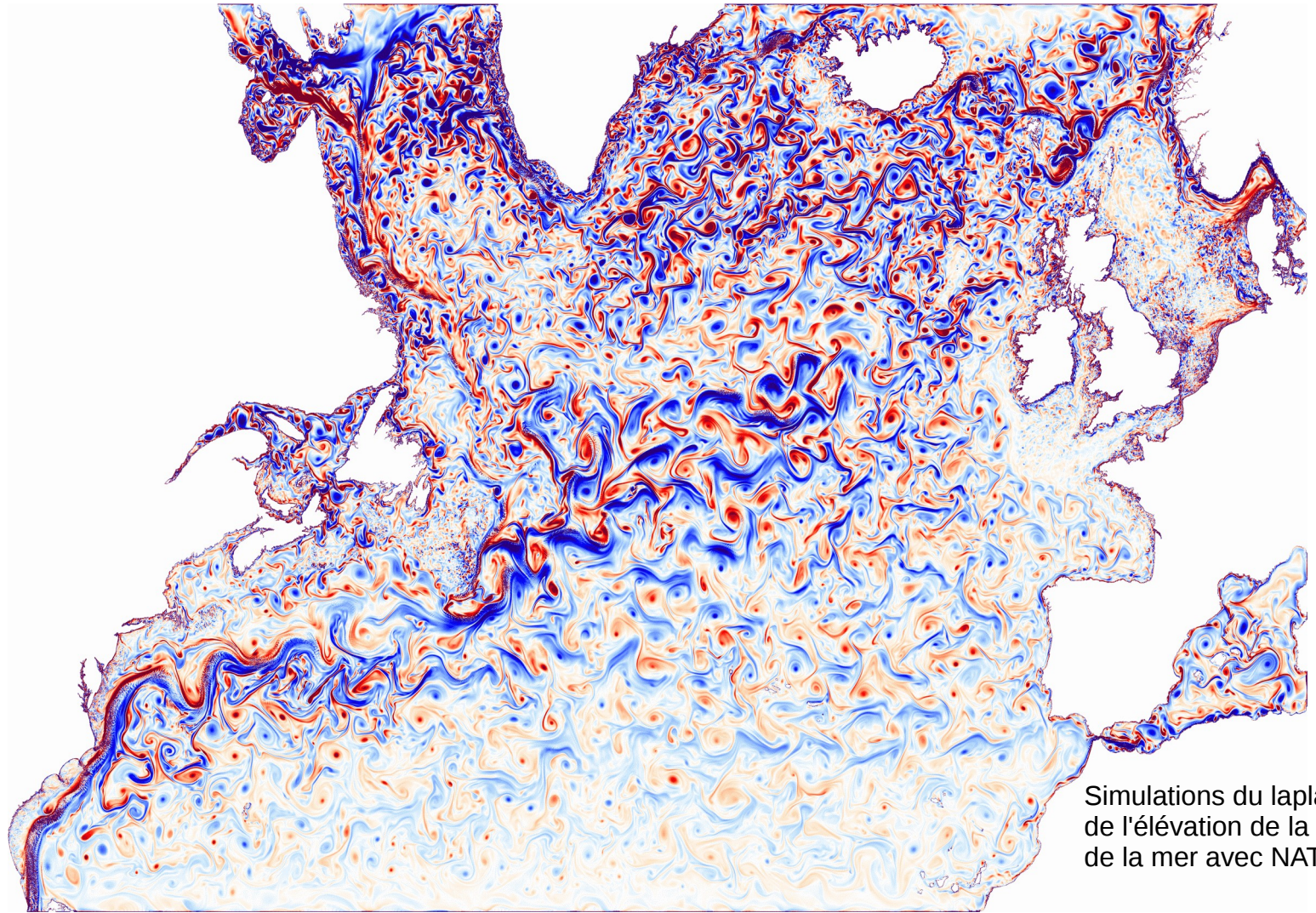
# RECONSTRUCTION DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE À PARTIR D'OBSERVATIONS SATELLITES À TRÈS HAUTE RESOLUTION

Marina Duran Moro

Équipe MEOM/LGGE, Grenoble

Thèse supervisée par Pierre Brasseur et Jacques Verron

En collaboration avec Jean-Michel Brankart



Simulations du laplacien  
de l'élévation de la surface  
de la mer avec NATL60

# PLAN

1. Contexte
2. De l'approche à la problématique
3. La méthode
4. Analyses et résultats
5. Conclusions et perspectives

# 1. CONTEXTE

Les échelles dans l'océan

Altimétrie à haute résolution : la mission SWOT

Enjeux/objectif

➤ **Reconstruire la circulation à quelles échelles ?**

Injection d' énergie  
 Instabilités BT/BC  
 Géostrophie

Turbulence QG

Turbulence stratifiée

Dissipation d'énergie

Turbulence 3D

Cascade inverse d'énergie

Cascade directe d'énergie

*Grandes échelles*

*Échelles dissipatives*

10000 km

1000 km

100 km

10 km

1 km

100 m

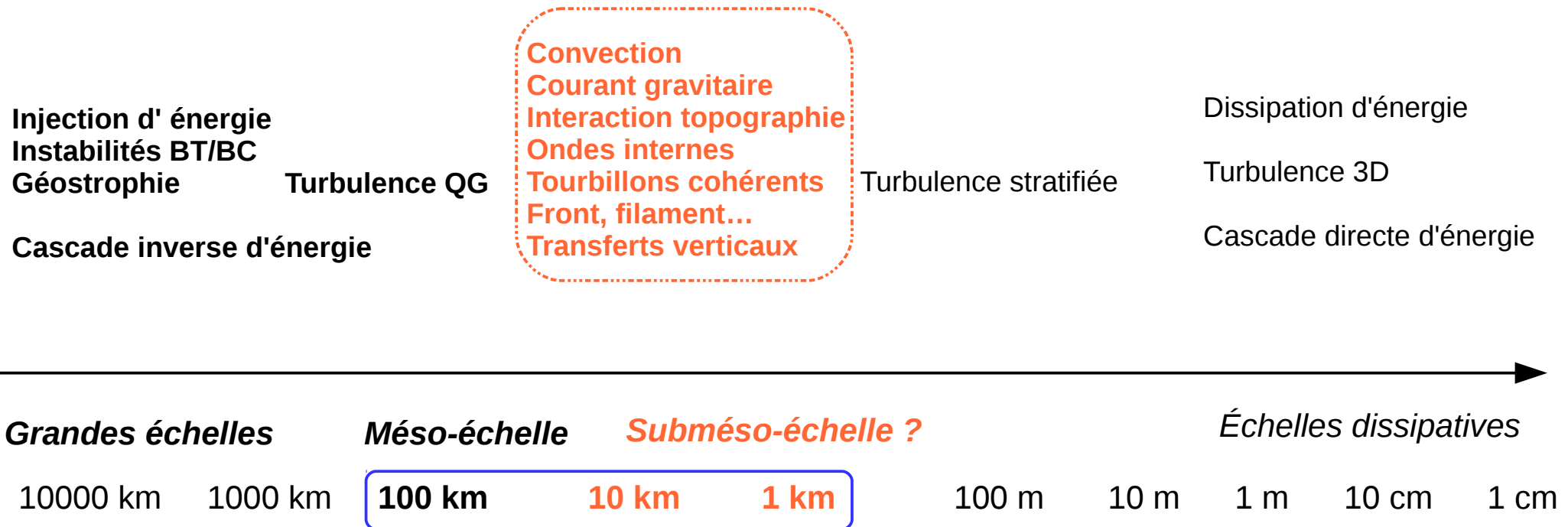
10 m

1 m

10 cm

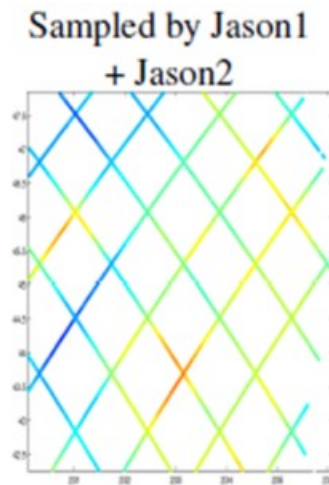
1 cm

- Reconstruire la circulation océanique à **méso-échelle ( et subméso-échelle ) ?**

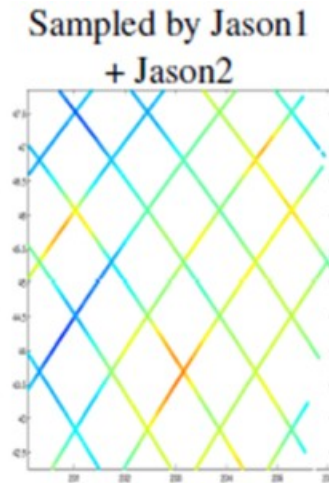


- Inconnaissance de lois physiques
- Importance dans les transferts d'énergie cinétique

- **Satellites profileurs** : mesure en continu au nadir (1D)
  - altimétrie nadir



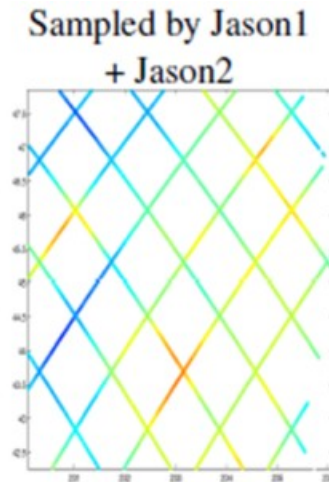
- **Satellites profileurs** : mesure en continu au nadir (1D)
  - altimétrie nadir



**Observations ponctuelles**

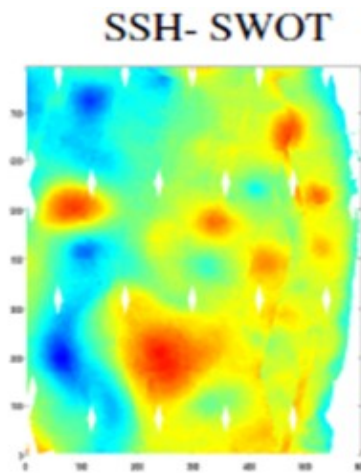


- **Satellites profileurs** : mesure en continu au nadir (1D)
  - altimétrie nadir

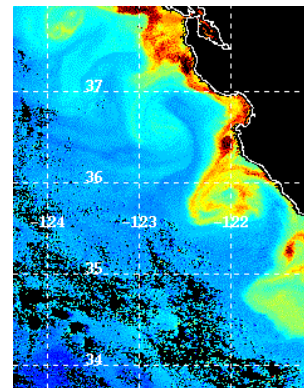


## Observations ponctuelles

- **Satellites imageurs** : mesure en continu sur large bande de mesure (2D)
  - nouvelle mission **SWOT**
  - **traceurs** : salinité, température, couleur de l'eau

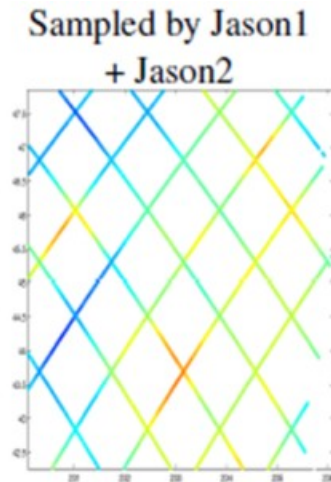


Couleur de l'eau-SeaWifis



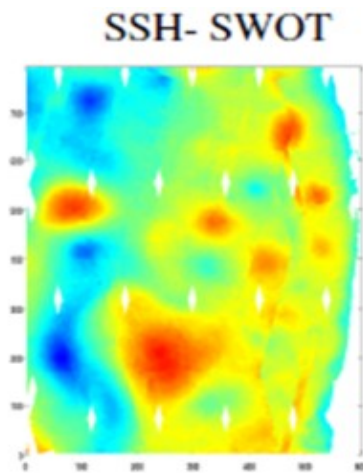


- **Satellites profileurs** : mesure en continu au nadir (1D)
  - altimétrie nadir

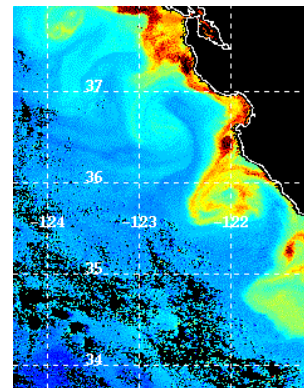


## Observations ponctuelles

- **Satellites imageurs** : mesure en continu sur large bande de mesure (2D)
  - nouvelle mission **SWOT**
  - **traceurs** : salinité, température, couleur de l'eau



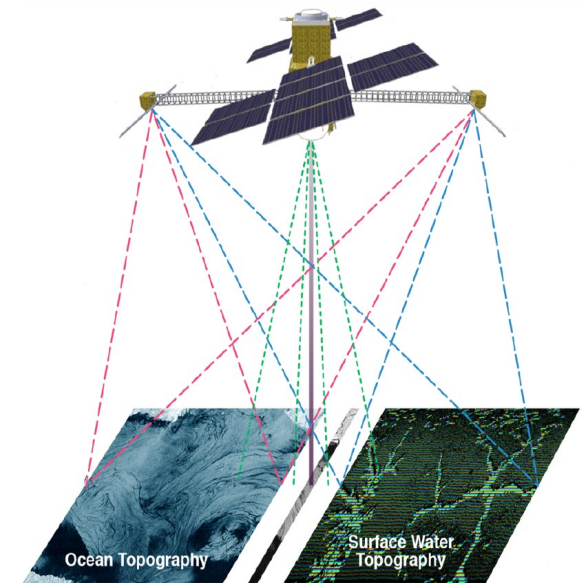
Couleur de l'eau-SeaWifis



## Structure d'image

➤ La mission future SWOT (Sea Surface Water Ocean Topography)

- Projet hydro-océano CNES/NASA ~2020
- Couverture du globe presque totale
- Larges **fauchées de 50 km** séparées de 20 km
- **Information image :**
  - mesures de **SSH** (Sea Surface Height)
  - résolution spatiale : **~10-20 km**
  - résolution temporelle : **21 jours**



Configuration du satellite SWOT<sup>10</sup>

## Enjeux

- Fortes erreurs d'observation sur les futures mesures SWOT
- Fortes incertitudes dans les prévisions fournies par les modèles numériques HR

## Objectif

- Comment on peut exploiter **l'information image** provenant de l'observation satellitaire pour **contraindre la prévision du modèle numérique ?**

## 2. L'APPROCHE

Région d'étude

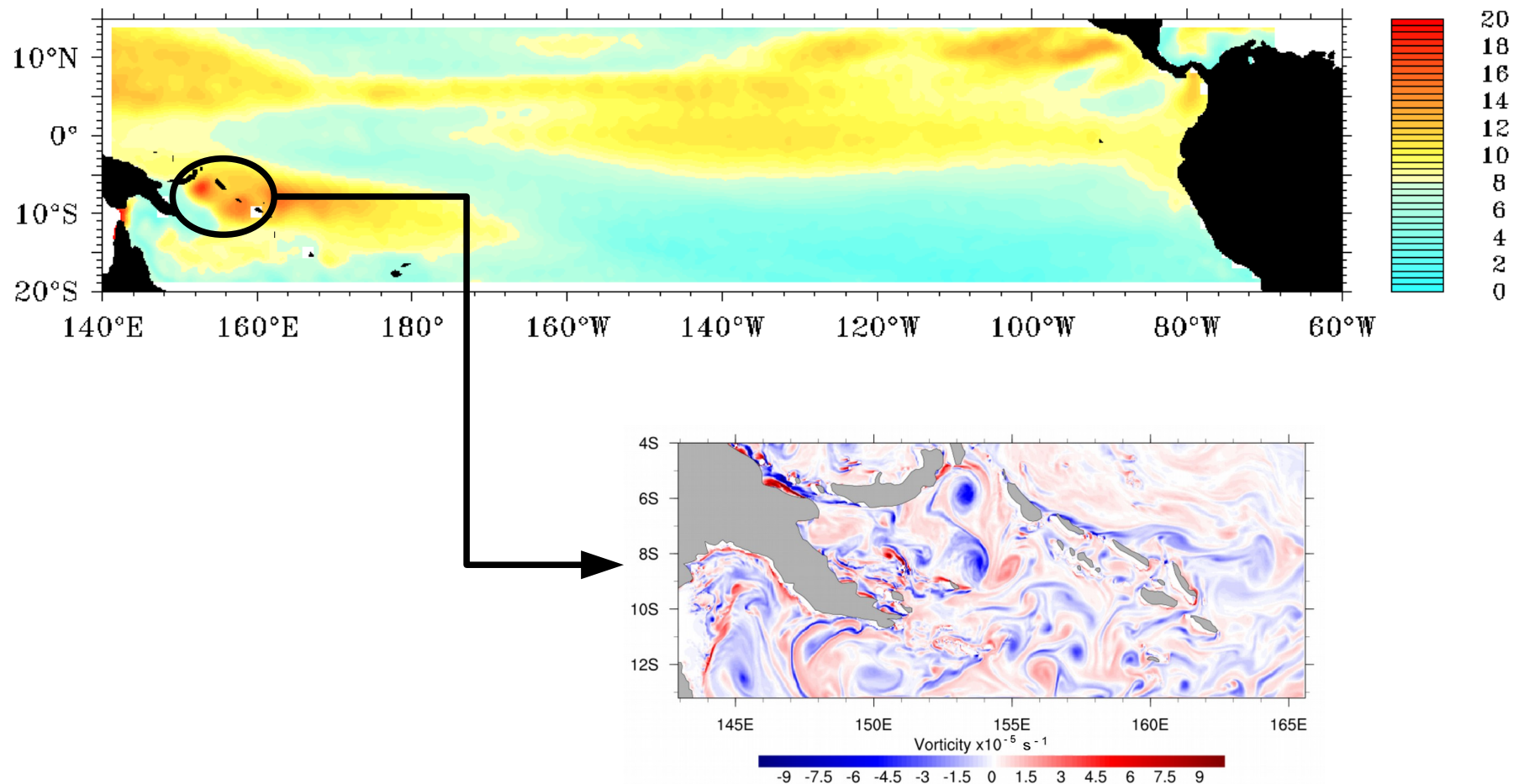
Modèle numérique

Assimilation de données classique

Inversion d'images

## Région d'étude : la Mer de Salomon

- Forte activité en méso et submésos-échelle due aux instabilités de courant et topographie complexe
- Avantage : un grand rayon de déformation de Rossby  $\sim 100$  km



## Modèle numérique de la région :

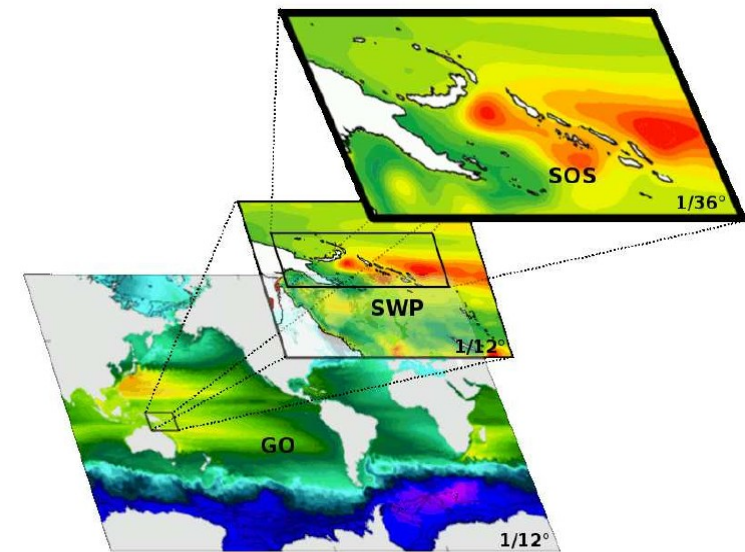
SOSMOD36 (Solomon Sea model; Djath et al, 2014)

Modèle code NEMO/OPA

- Équations de Navier-Stokes
- Approximations : hydrostatique, Boussinesq

Système de modèles emboîtés

- Haute résolution spatiale  $1/36^\circ$  (~3 km)
- Dimension spatiale : 46 niveaux



Configuration modèles emboîtés



## Modèle numérique de la région :

SOSMOD36 (Solomon Sea model; Djath et al, 2014)

Modèle code NEMO/OPA

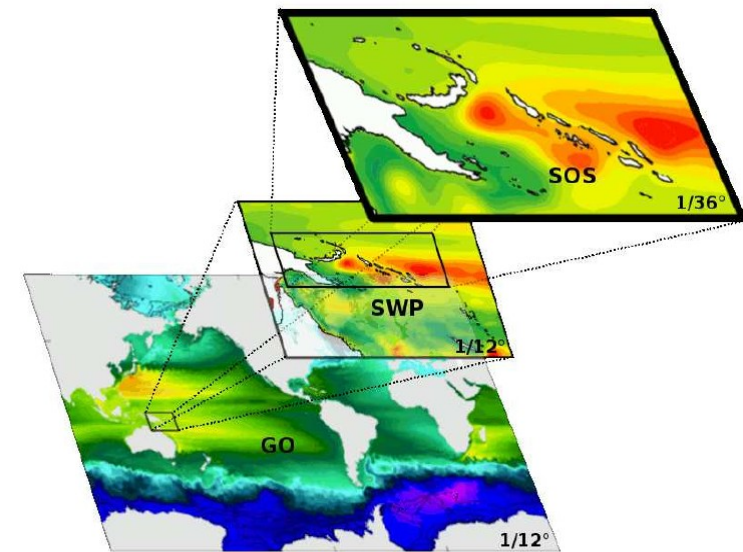
- Équations de Navier-Stokes
- Approximations : hydrostatique, Boussinesq

Système de modèles emboîtés

- Haute résolution spatiale  $1/36^\circ$  ( $\sim 3$  km)
- Dimension spatiale : 46 niveaux



**Rayon de déformation dans la région  
~ 100 km → résolu par la grille du  
modèle ( $\sim 3$  km)**



Configuration modèles emboîtés

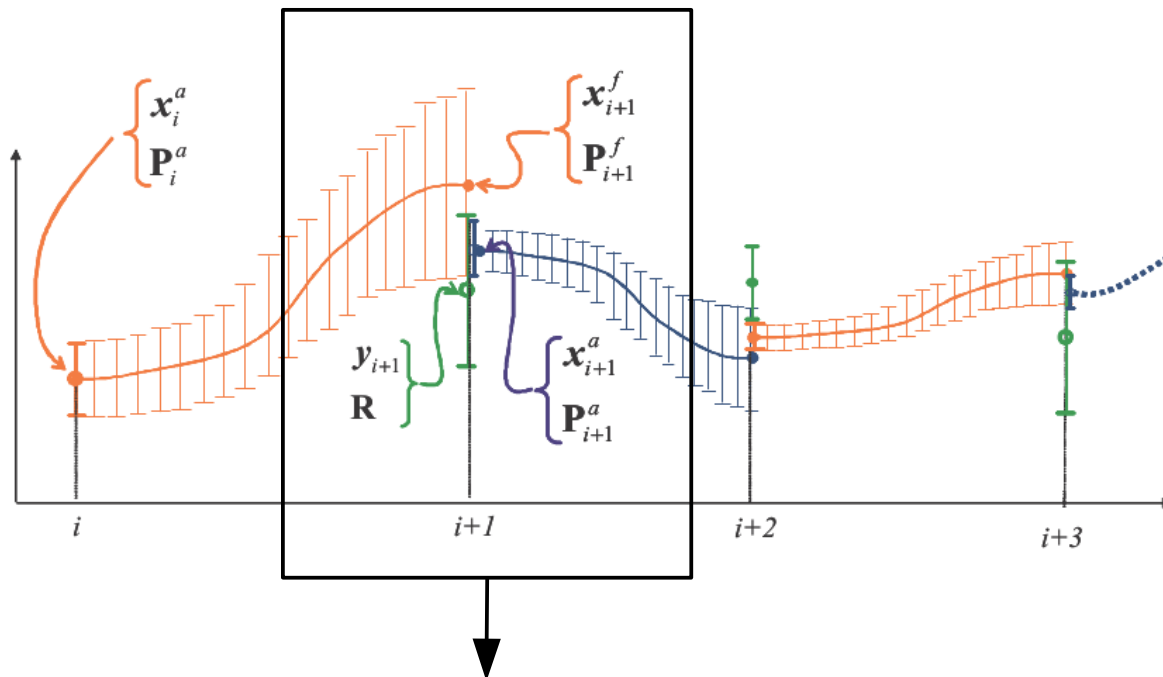
# Combinaison de plusieurs méthodes pour assimiler l'information haute-résolution satellitaire dans les modèles ?

**1) Assimilation classique**

**2) Assimilation d'images**

## 1) Assimilation de données séquentielle

Filtre SEEK (sequential Kalman filter)



Une étape d'analyse du filtre de Kalman

$$x^a = x^f + K (y - Hx^f)$$

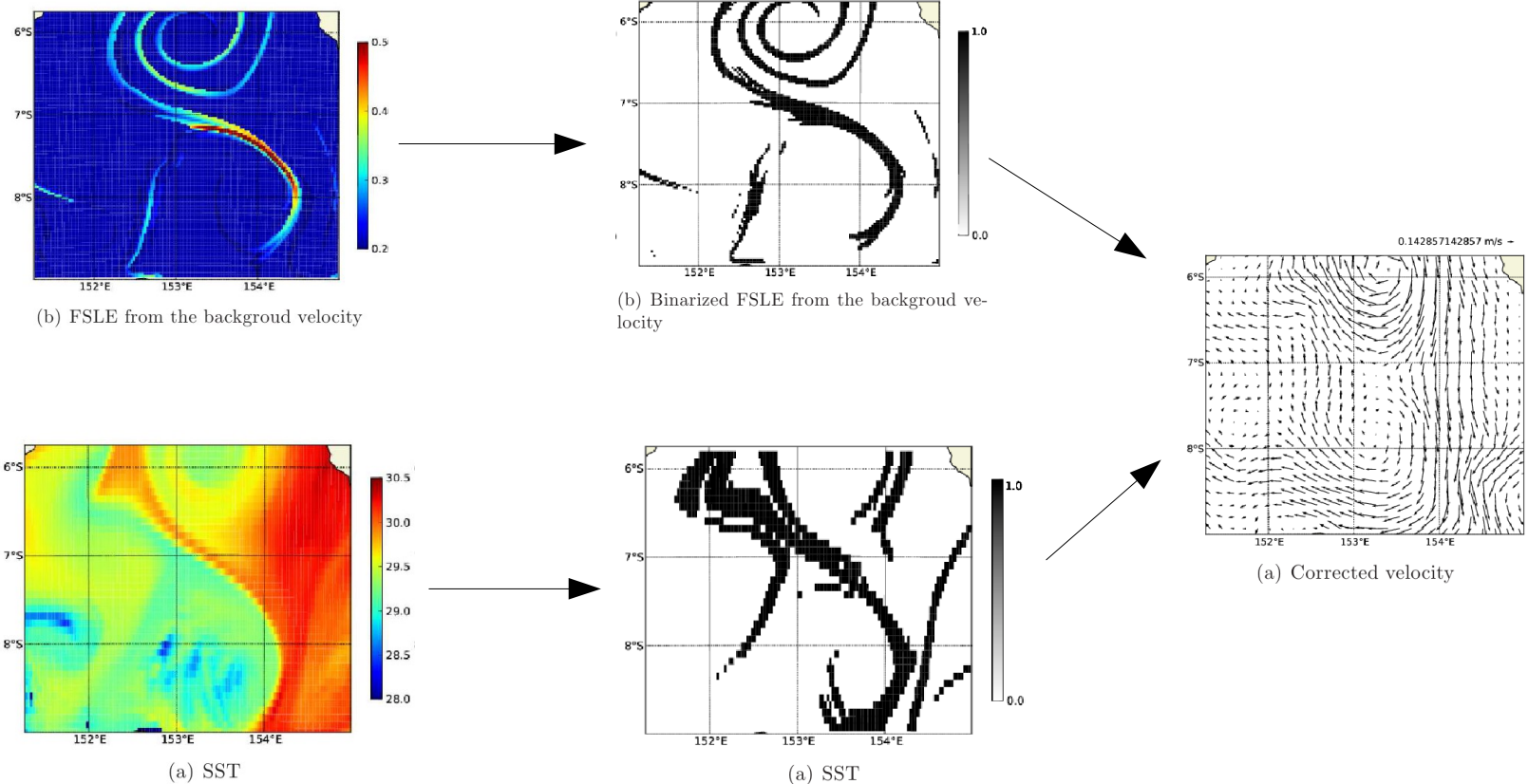
# Combinaison de plusieurs méthodes pour assimiler l'information haute-résolution satellitaire dans les modèles ?

**1) Assimilation classique**

**2) Assimilation d'images**

## 2) Assimilation d'images structure : Gaultier et al, 2012

Correction de champs de vitesses de surface à méso-échelle à partir d'une méthode d'assimilation d'images structure



**Désavantages de la méthode :**

- **Coût de calcul très élevé**
- **Problème de convergence si l'ébauche est trop imprécise**

# 3. LA MÉTHODE

La méthode en 2 étapes

Définition de notre expérience jumelle



# 3. LA MÉTHODE

## La méthode en 2 étapes

Définition de notre expérience jumelle

Méthode d'analyse en 2 étapes :

**1. Étape de pré-conditionnement : une étape du filtre SEEK**

Observation : l'élévation de surface de la mer (SSH)

**2. Deuxième étape d'analyse : méthode de minimisation d'une fonction coût**

Observation : image structure ( $\lambda_0$ ).

Les **trois extensions principales** apportées par cette méthode sont :

- 1) Génération des *estimés 3D et multivariés*.
- 2) Une étape de *pré-conditionnement* est mis en place pour réduire le coût de la deuxième étape (la méthode de minimisation).
- 3) Une *approche probabiliste* est réalisée qui permet d'avoir une description des incertitudes à chaque étape.

→ **Papier soumis à Ocean Dynamics**

## Approche probabiliste : description des incertitudes à chaque étape

- La distribution de probabilité d'ébauche est supposée gaussienne

$$P^b(\mathbf{x}) = N(\mathbf{x}_b, B)$$

l'ébauche  $\mathbf{x}^b$

la matrice de covariance d'erreur  $B = S^b S^{b^T}$

- Cette distribution de probabilité modifiée à chaque étape de l'analyse

Application du **théorème de Bayes** à chaque étape :

1. Première étape d'analyse. Observation de SSH ( $\mathbf{y}_1$ ).

$$P^{a1}(\mathbf{x}) \propto P^b(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_1|\mathbf{x})$$

2. Deuxième étape d'analyse. Observation d'image structure ( $\mathbf{y}_2$ ).

$$P^{a2}(\mathbf{x}) \propto P^{a1}(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_2|\mathbf{x})$$

On applique le **théorème de Bayes** à chaque étape :

1. Première étape d'analyse. Observation de SSH ( $\mathbf{y}_1$ ).

$$P^{a1}(\mathbf{x}) \propto P^b(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_1|\mathbf{x})$$

2. Deuxième étape d'analyse. Observation d'image structure ( $\mathbf{y}_2$ ).

$$P^{a2}(\mathbf{x}) \propto P^{a1}(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_2|\mathbf{x})$$



## Première étape d'analyse

- On réalise une étape du **filtre SEEK** pour avoir le nouvel estimé

$$\text{Nouvel estimé} \quad \mathbf{x}_{a1} = \mathbf{x}_b + K(\mathbf{y}_1 - H\mathbf{x}_b)$$

$$\text{Matrice de covariance d'erreur mise à jour} \quad B^{a1}$$

- Génération de la distribution de probabilité  $P^{a1}(\mathbf{x}) \propto P^b(\mathbf{x})P(\mathbf{y}_1|\mathbf{x})$

$P(\mathbf{y}_1|\mathbf{x})$  est supposée gaussienne

$$P^{a1}(\mathbf{x}) = N(\mathbf{x}_{a1}, B^{a1})$$

On applique le **théorème de Bayes** à chaque étape :

1. Première étape d'analyse. Observation de SSH ( $\mathbf{y}_1$ ).

$$P^{a1}(\mathbf{x}) \propto P^b(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_1|\mathbf{x})$$

2. Deuxième étape d'analyse. Observation d'image structure ( $\mathbf{y}_2$ ).

$$P^{a2}(\mathbf{x}) \propto P^{a1}(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_2|\mathbf{x})$$

## Deuxième étape d'analyse

- Approximation du minimum de la fonction coût

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^{a1} + S^{a1} \boldsymbol{\xi} \qquad B^{a1} = S^{a1} S^{a1T}$$

Application de **l'algorithme de refroidi simulé** (simulated annealing) pour échapper les minima locaux

$$J[\boldsymbol{\xi}] = \mu \|\hat{\lambda}[\mathbf{u}(\mathbf{x}(\boldsymbol{\xi}))] - \hat{\lambda}_o\| + \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi}$$

Après cette étape un nouvel estimé  $\mathbf{x}^{a2}$  est produit

- Génération de la distribution de probabilité  $P^{a2}(\mathbf{x}) \propto P^{a1}(\mathbf{x}) P(\mathbf{y}_2|\mathbf{x})$

$$P^{a2}(\mathbf{x}) \propto \exp(-J)$$

Application de **l'algorithme de Metropolis /Hastings**

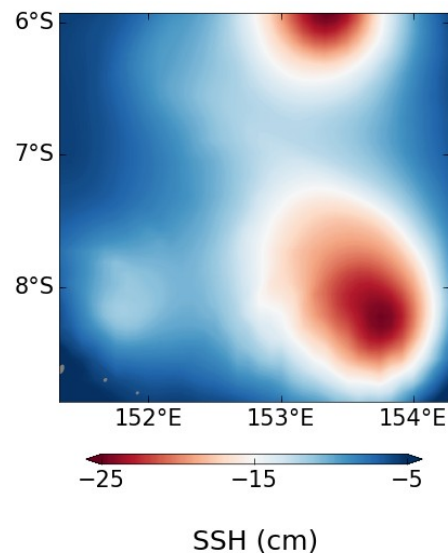
# 3. LA MÉTHODE

La méthode en 2 étapes

**Définition de notre expérience jumelle**

- Simulations modèle régional SOSMOD36 : 365 moyennes journalières 1993
- Construction de 50 états 3D et multivariées
  - 8 variables : S, T, u, v, w, SSH, laplacien de SSH, vorticité
  - 3D : 46 niveaux
- Construction du sous-espace d'erreur (50 EOFs)
  - Matrice de covariance d'erreur  $B = S^b S^{b^T}$
- Choix d'un état vrai parmi les 50 états : 22 décembre 1993

État vrai



SSH

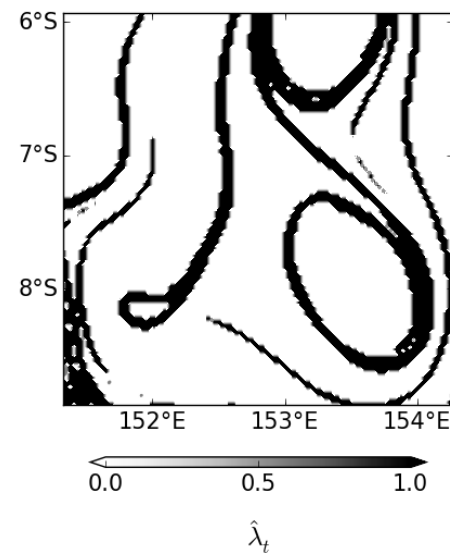
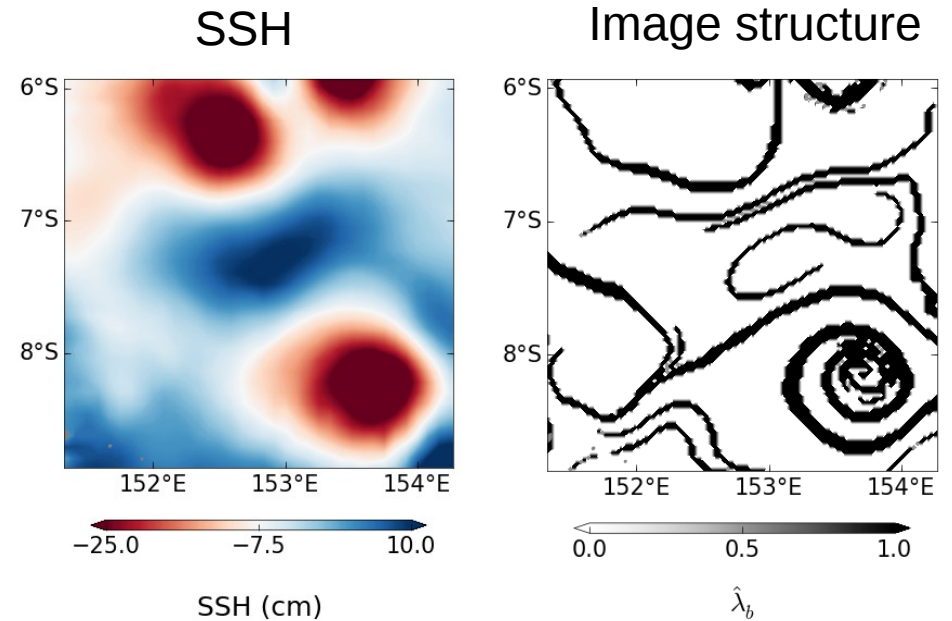


Image structure

- Ébauche : notre état à corriger

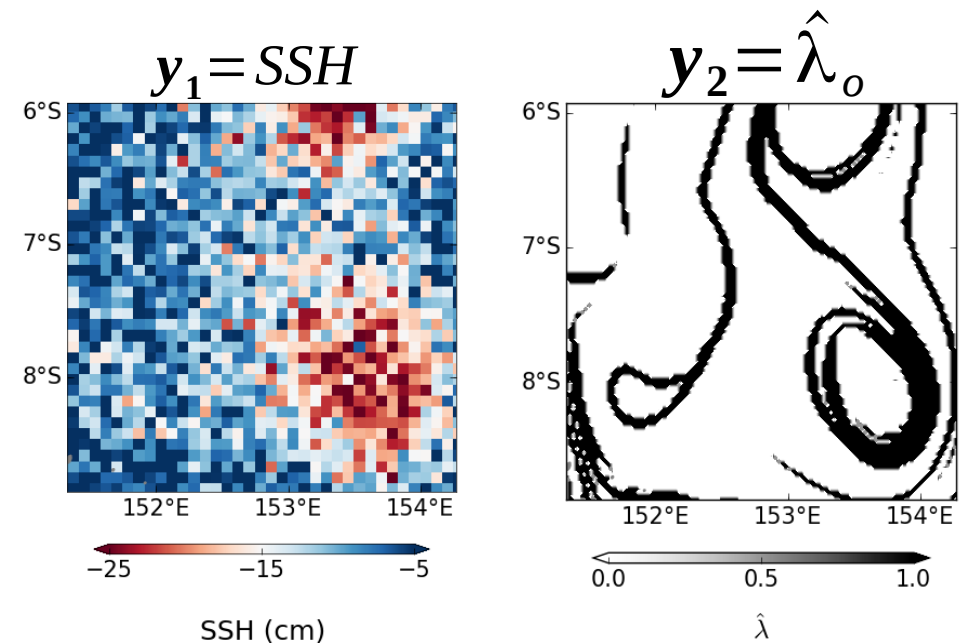
$$x_b = x_t + S^b \alpha$$



- Le vecteur d'observation :

$$y = [y_1, y_2]$$

Les erreurs d'observation entre SSH et image structure sont supposées indépendants



Notre expérience jumelle est définie par :

- Le sous-espace d'erreur défini par la matrice  $\mathbf{B}$  qui contient EOFs 3Ds et multivariées
- Ébauche 3D et multivariée  $\mathbf{x}^b$
- Observation de SSH en surface ( $\mathbf{y}_1 = \mathbf{SSH}$ )
- Observation d'image HR (proche de la surface) ( $\mathbf{y}_2 = \lambda_o$ )

On a vu :

- La méthode en 2 étapes
- La définition de l'expérience jumelle

Partie suivante :

- La méthode a été testée dans le cadre de cette expérience jumelle
- Résultats produits



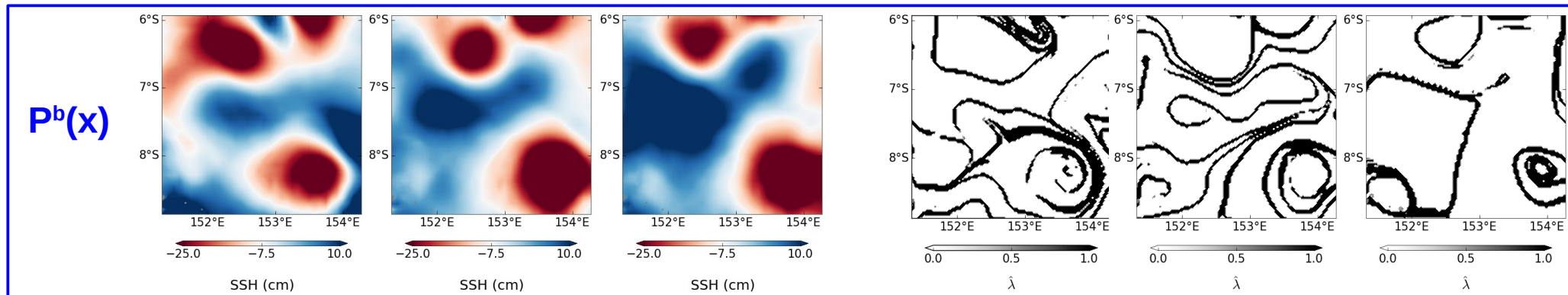
# 4. RÉSULTATS

La modification de la distribution de probabilité  
à chaque étape

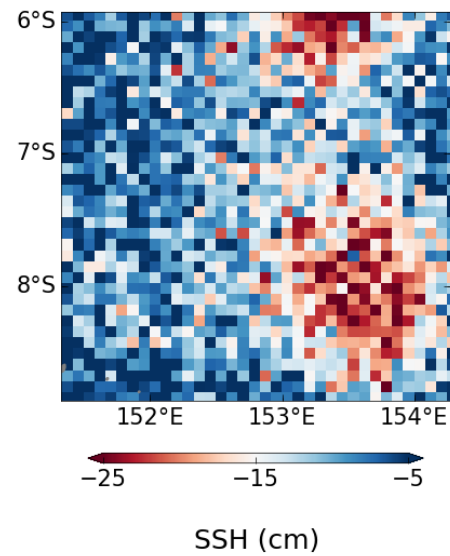
La reconstruction dans la verticale

L'apport de l'observation d'image structure HR

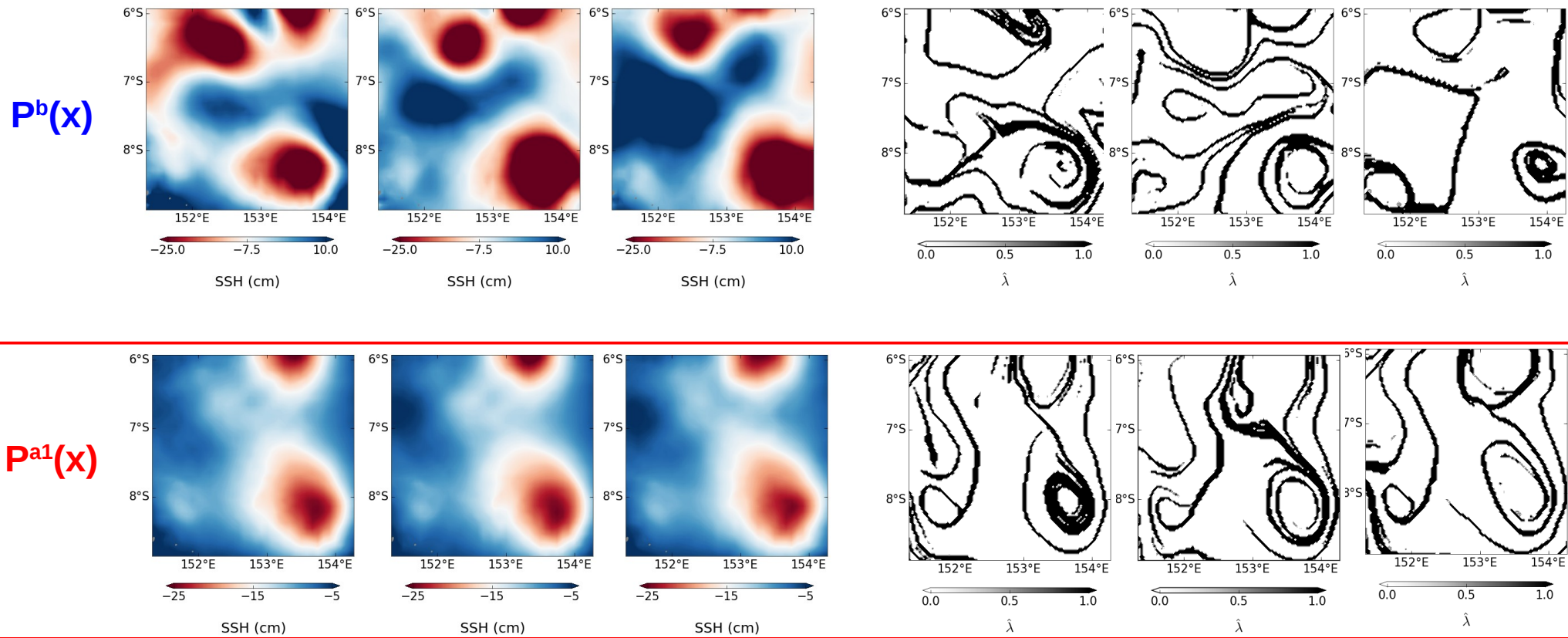
## Approche probabiliste de la méthode : mise à jour de la distribution de probabilité à chaque étape



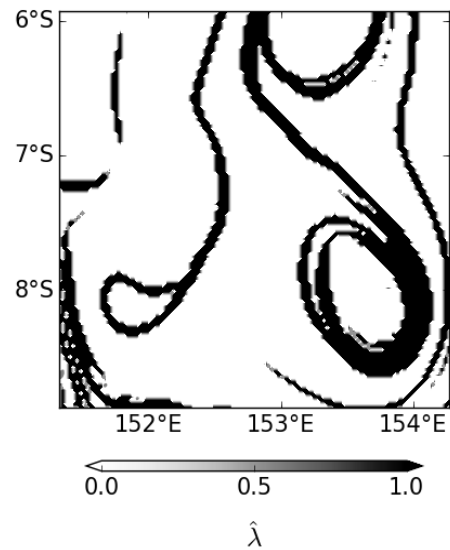
- Une étape du filtre SEEK
- Observation de SSH



## Approche probabiliste de la méthode : mise à jour de la distribution de probabilité à chaque étape

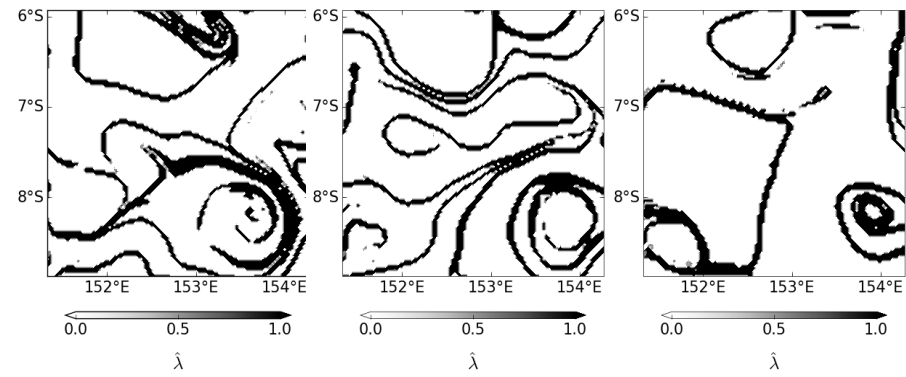
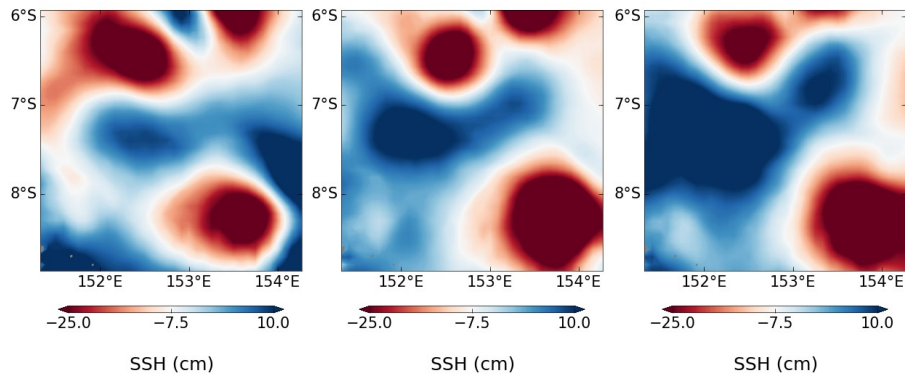


- Méthode de minimisation
- Observation d'image HR

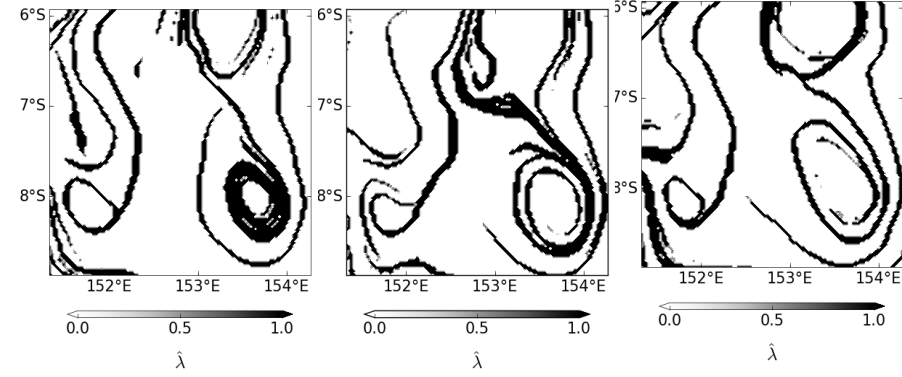
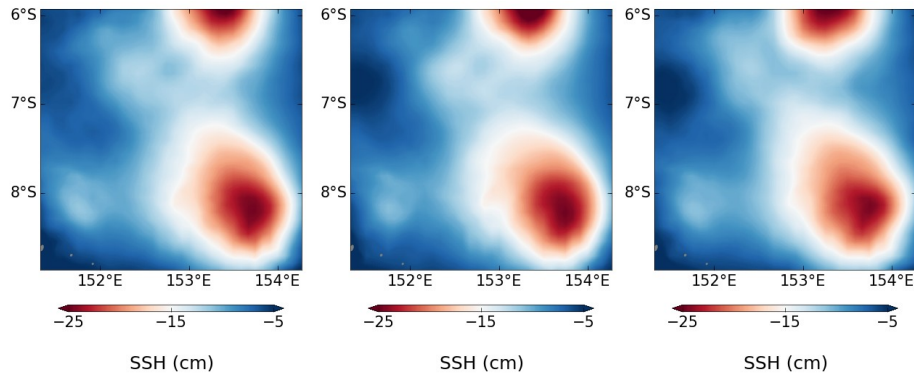


# Approche probabiliste de la méthode : mise à jour de la distribution de probabilité à chaque étape

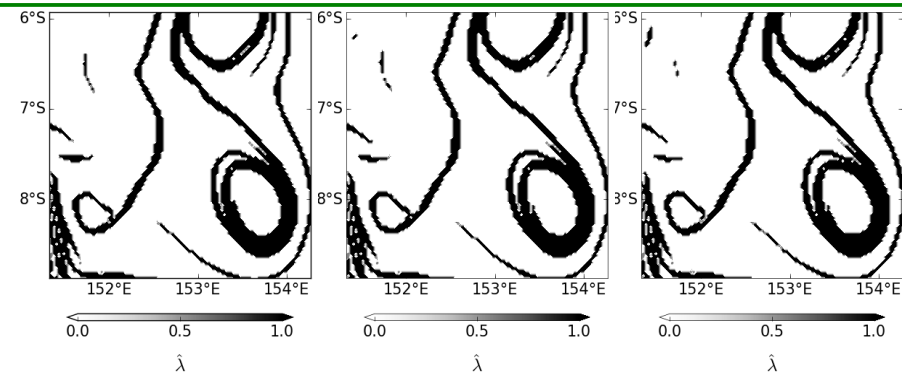
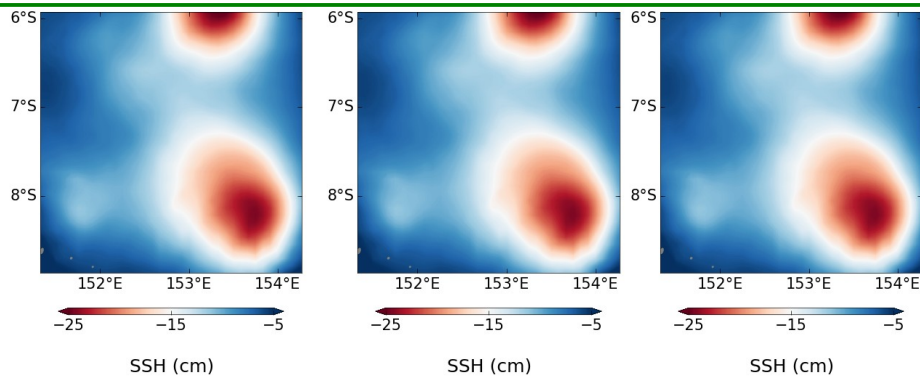
$P^b(x)$



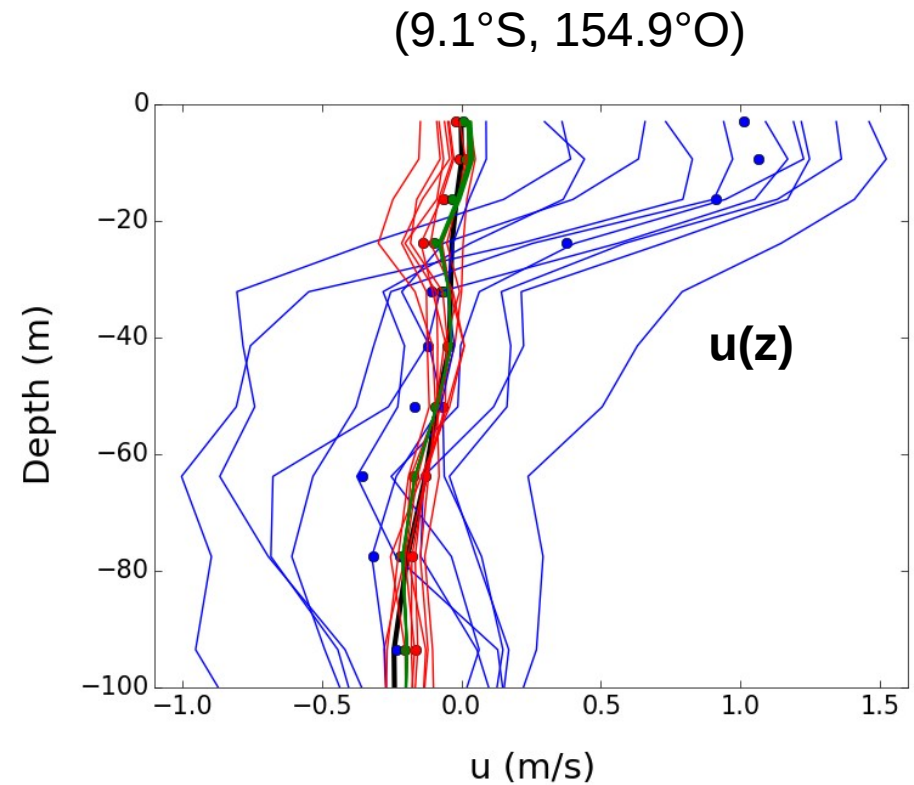
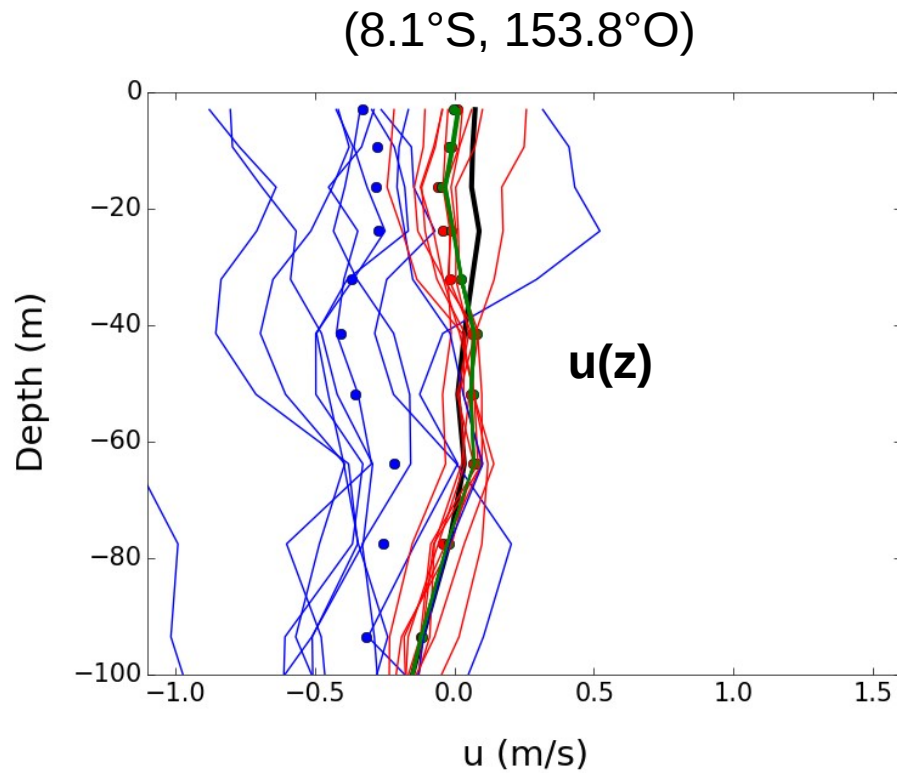
$P^{a1}(x)$



$P^a(x)$

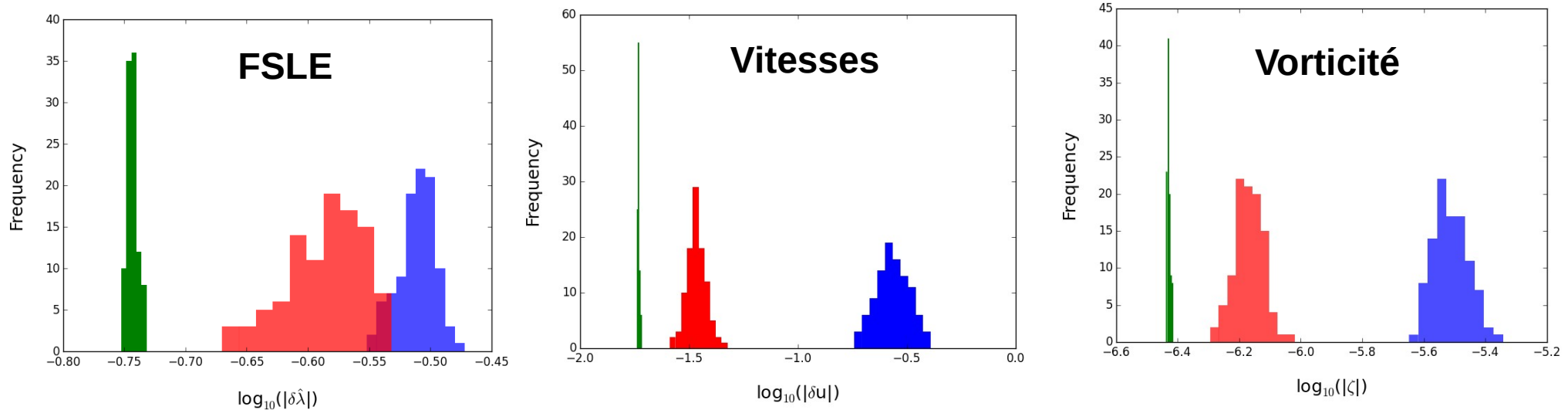


## Profils verticaux de vitesse zonale $u(z)$ à trois coordonnées différentes :



- Information parfaite sur  $u$ .
- Dispersion forte autour du profil de  $u$ .
- Réduction significative de la dispersion/incertitude.
- Réduction supplémentaire de la dispersion, mais, à certains endroits, pas vraiment d'amélioration de l'analyse.

## Histogrammes de la norme de l'erreur de FSLE, module de vitesses et vorticité :



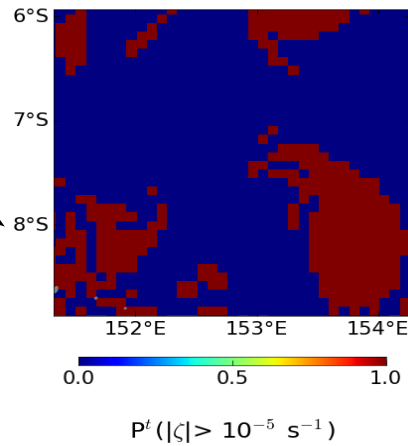
- **Forte erreur et dispersion pour toutes les variables.**
- **Erreur substantielle et réduction de l'erreur pour toutes les variables sauf FSLE. Encore forte dispersion.**
- **Réduction de l'erreur associée à chaque variable inclus aussi le FSLE.**

→ Question : Est-ce que la réduction de l'erreur est significative après la deuxième étape ?

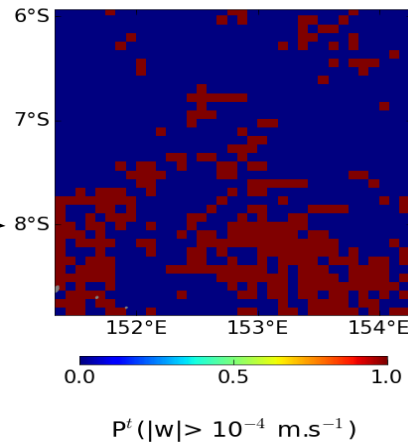


## Probabilité de l'ensemble de dépasser un seuil fixé :

Vorticité  
 $P(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$



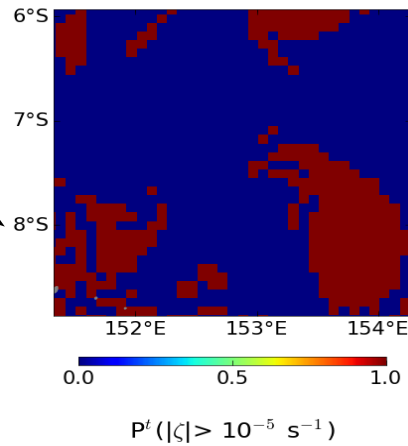
Vitesse verticale  
 $P(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



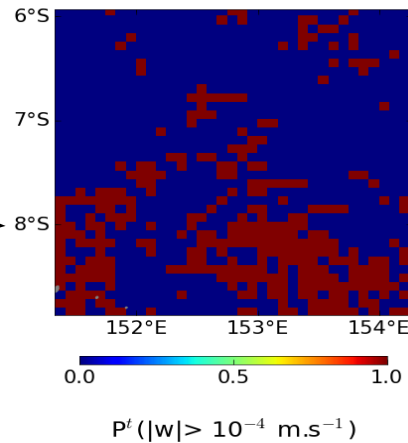
**Information  
parfaite sur  $w$   
( $P=0$  or  $1$ ).**

## Probabilité de l'ensemble de dépasser un seuil fixé :

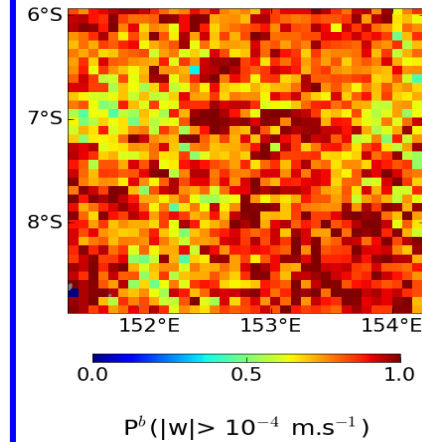
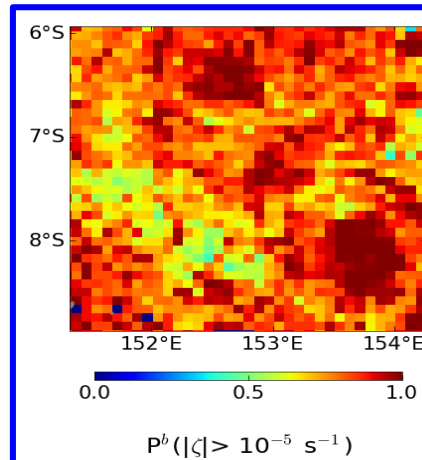
Vorticité  
 $P(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$



Vitesse verticale  
 $P(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



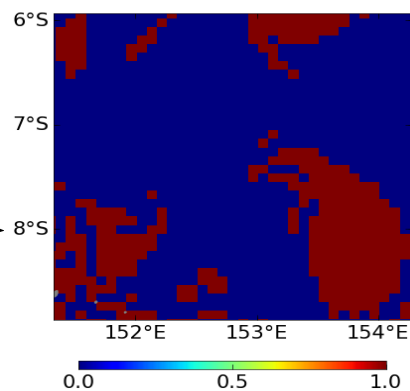
**Information  
 parfaite sur w  
 (P=0 or 1).**



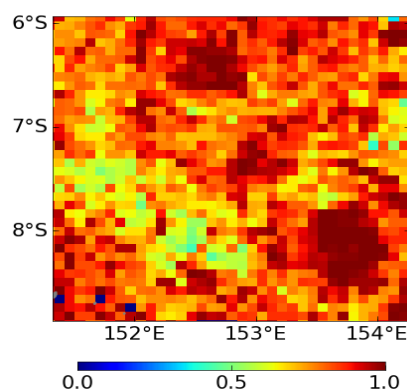
**Pas  
 d'information  
 sur w (P≈0.5-0.7  
 partout).**

## Probabilité de l'ensemble de dépasser un seuil fixé :

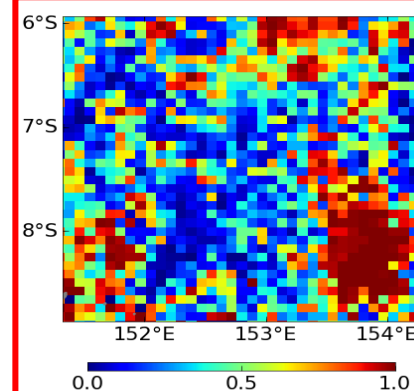
Vorticité  
 $P(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$



$P^l(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

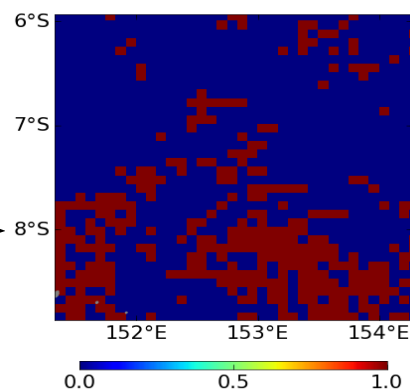


$P^b(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

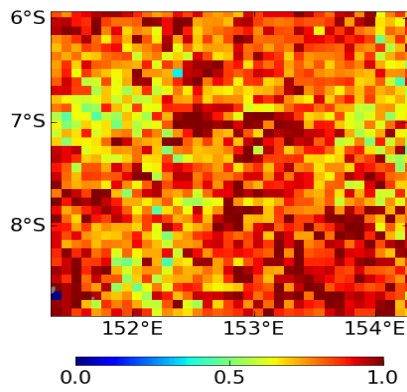


$P^{a1}(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

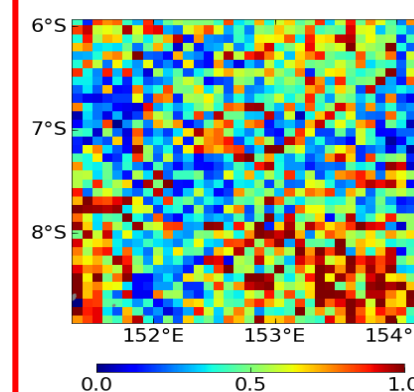
Vitesse verticale  
 $P(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^l(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^b(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^{a1}(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$

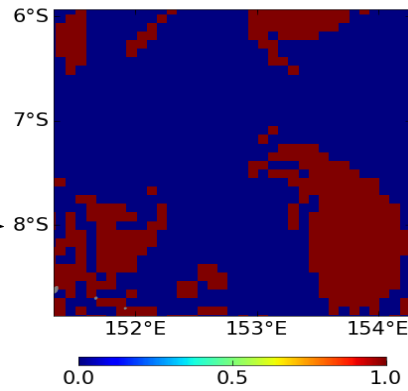
**Information parfaite sur w (P=0 or 1).**

**Pas d'information sur w (P≈0.5-0.7 partout).**

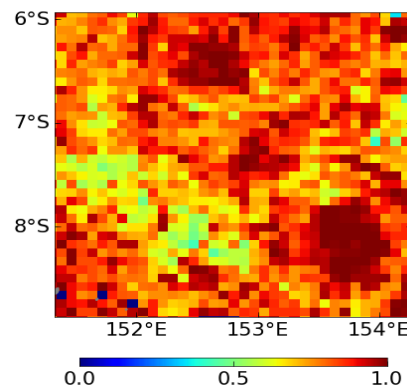
**Pas encore d'information assez précise sur w.**

## Probabilité de l'ensemble de dépasser un seuil fixé :

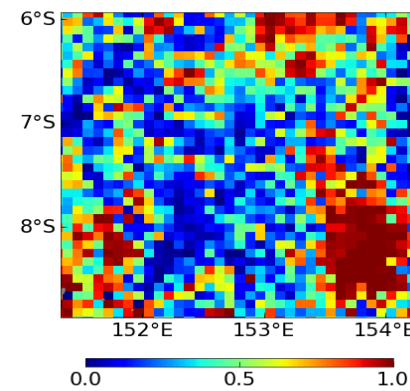
Vorticité  
 $P(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$



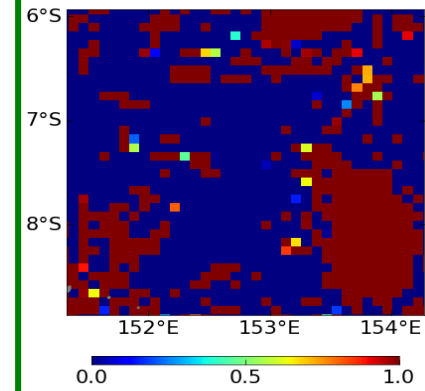
$P^t(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$



$P^b(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

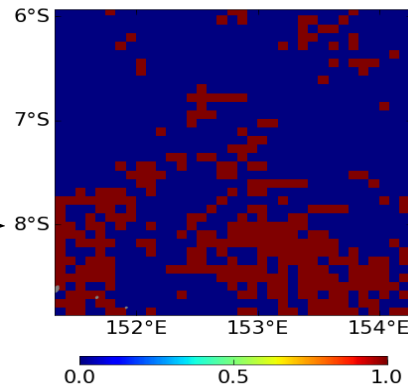


$P^{a1}(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

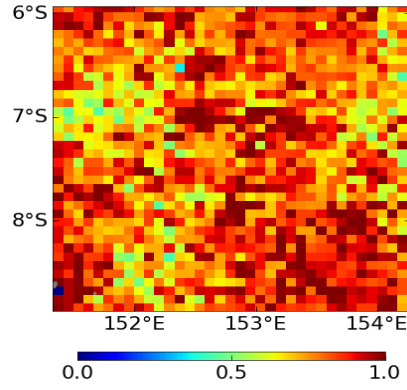


$P^{a2}(|\zeta| > 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

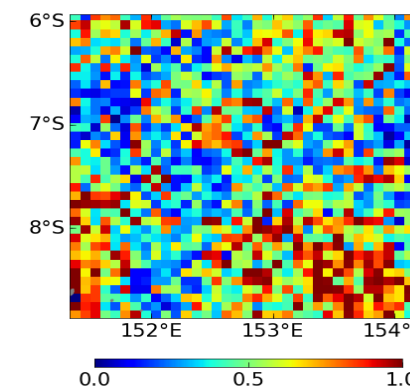
Vitesse verticale  
 $P(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



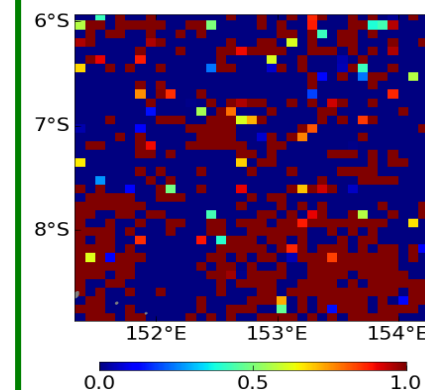
$P^t(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^b(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^{a1}(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$



$P^{a2}(|w| > 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$

Information  
parfaite sur  $w$   
( $P=0$  or  $1$ ).

Pas  
d'information  
sur  $w$  ( $P \approx 0.5-0.7$   
partout).

Pas encore  
d'information  
assez précise  
sur  $w$ .

Information  
précise sur  $w$ .

La 2<sup>ème</sup> étape : l'observation des images haute-résolution est importante pour reconstruire la bonne structure de l'écoulement à fine échelle.

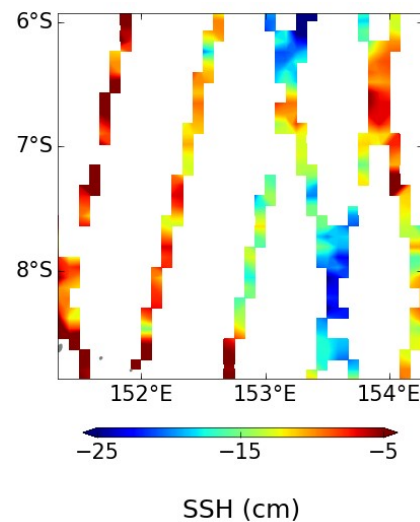
# 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## Conclusions

- Méthode en 2 étapes réussit à réaliser une **reconstruction 3D** de l'écoulement dans un cadre des **expériences jumelles** en utilisant des **observations de SSH et des images haute-résolution**.
- Le **pré-conditionnement** permet de :
  - réduire l'erreur d'ébauche
  - réduire le coût du calcul dans la 2<sup>ème</sup> étape
- L'**approche probabiliste** fournit la distribution de probabilité de l'écoulement en 3D qui décrit les incertitudes. Cette distribution est corrigée à chaque étape de l'analyse.
  - **1<sup>er</sup> étape** : l'observation de SSH utilisée dans l'analyse SEEK permet de corriger l'ébauche significativement aux larges échelles.
  - **2<sup>ème</sup> étape** : l'observation d'image structure est outil pour continuer à corriger la signal aux petites échelles.
- Les erreurs d'ébauche sont contenues dans la matrice de covariance d'erreur  $B$  : n'est pas forcément un cas réaliste

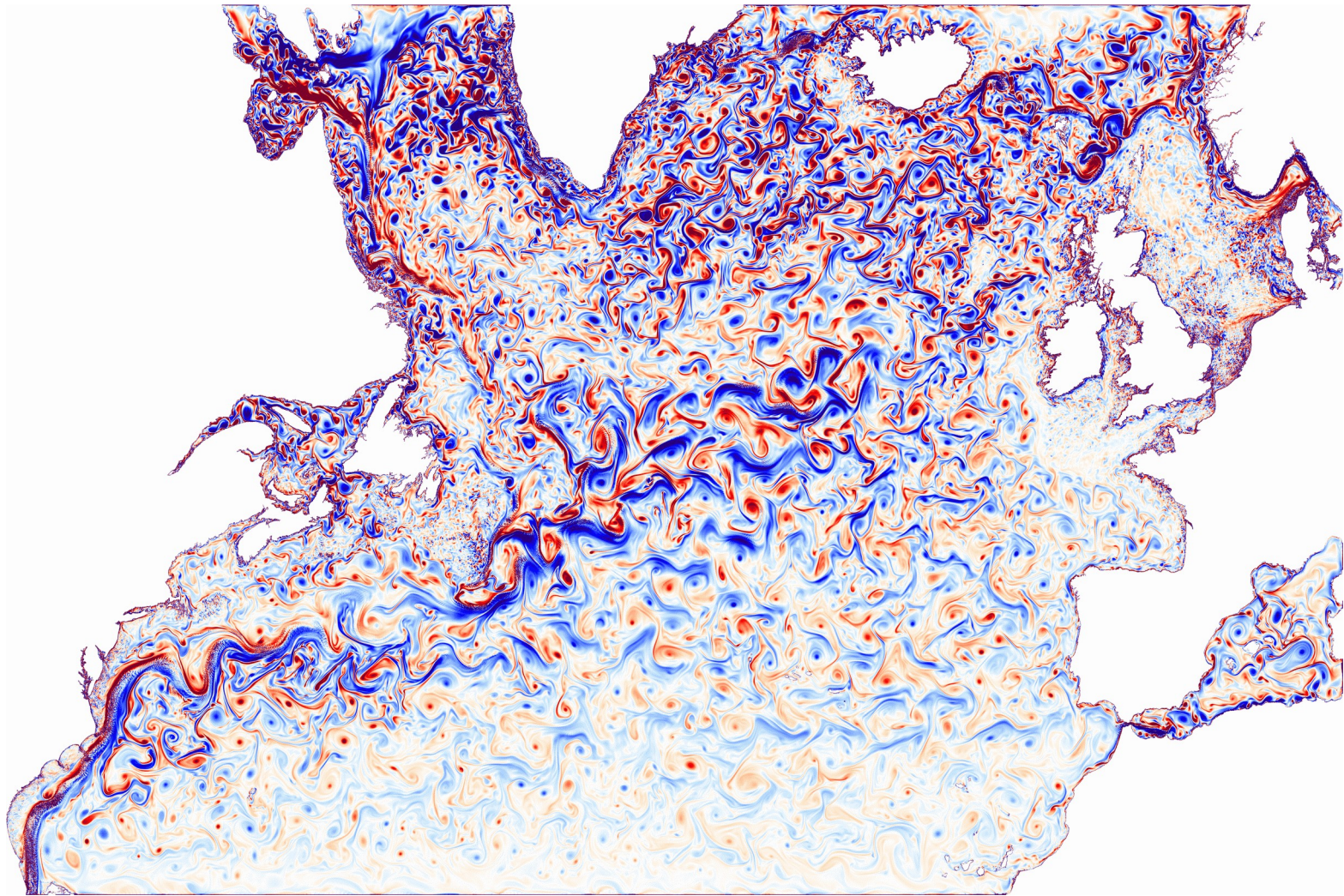
## Perspectives

- Exploration des observations réalistes :
  - 1) avec un réseau réaliste d'observations altimétriques (SWOT, satellites nadir...)
  - 2) avec un focus spécial sur les erreurs d'observation.





- Appliquer la méthode dans une autre région (Atlantique Nord, NATL60) pour étudier s'il y a une dépendance avec la dynamique.



Simulations du laplacien de l'élévation de la surface de la mer avec NATL60



*MERCI DE VOTRE ATTENTION*

*THANK YOU FOR YOUR ATTENTION*